

Olympiades de la Physique 2006 - 2007

Multi Son

Étude des sonneries « mosquitone » et d'effets sonores.

Groupe de Besançon, lycées Louis Pergaud et Victor Hugo

Élèves :

Pierre MARAVAL

Alexandre FLEURET

Galdim ZEQUIRI

Baptiste LEMERCIER

Michaël BOURGEOIS

Professeurs :

Sylvie GUILLOSSEAU

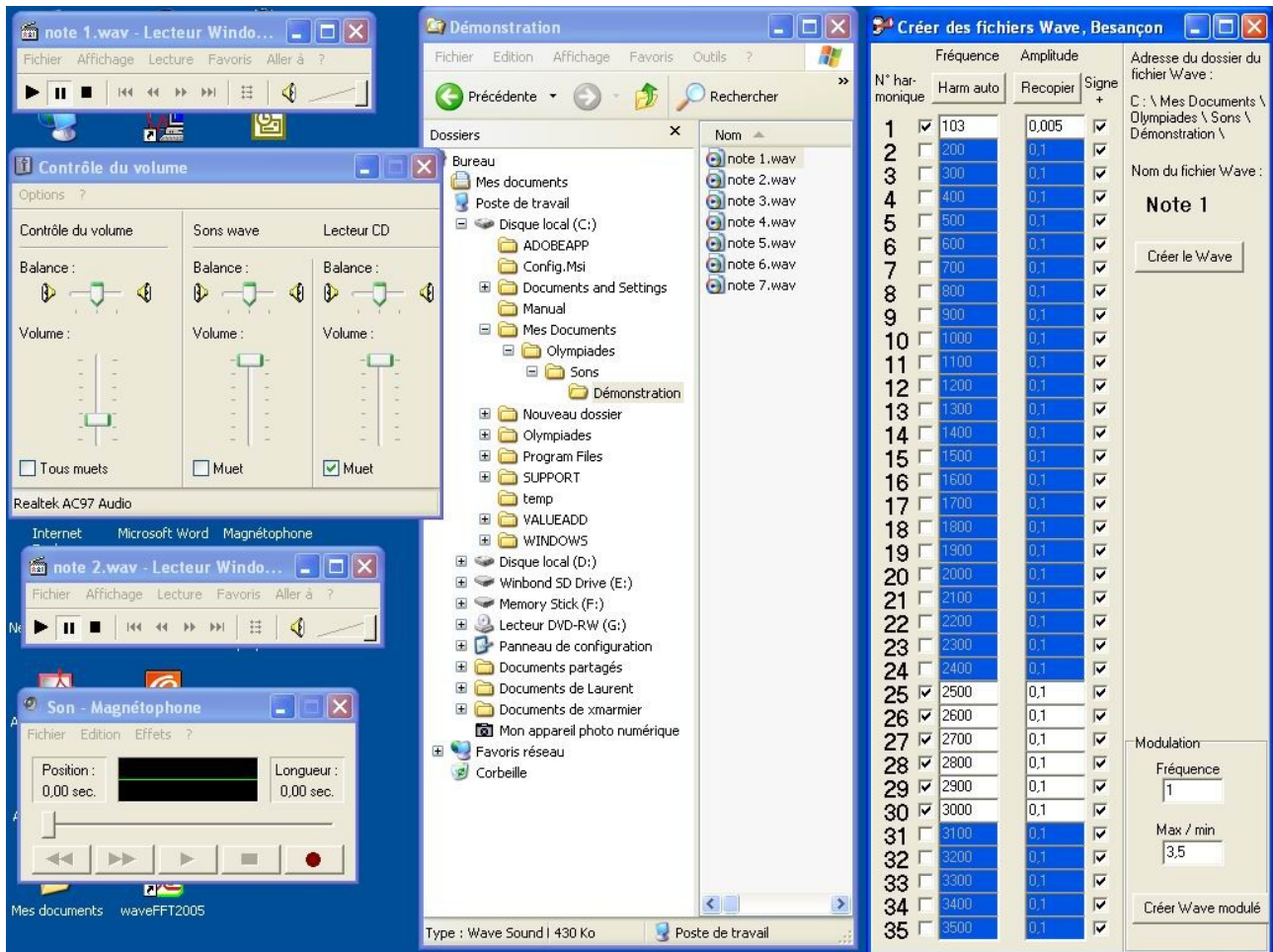
Jean-Michel JUSSIAUX

Conseiller scientifique :

Marc TULOUP

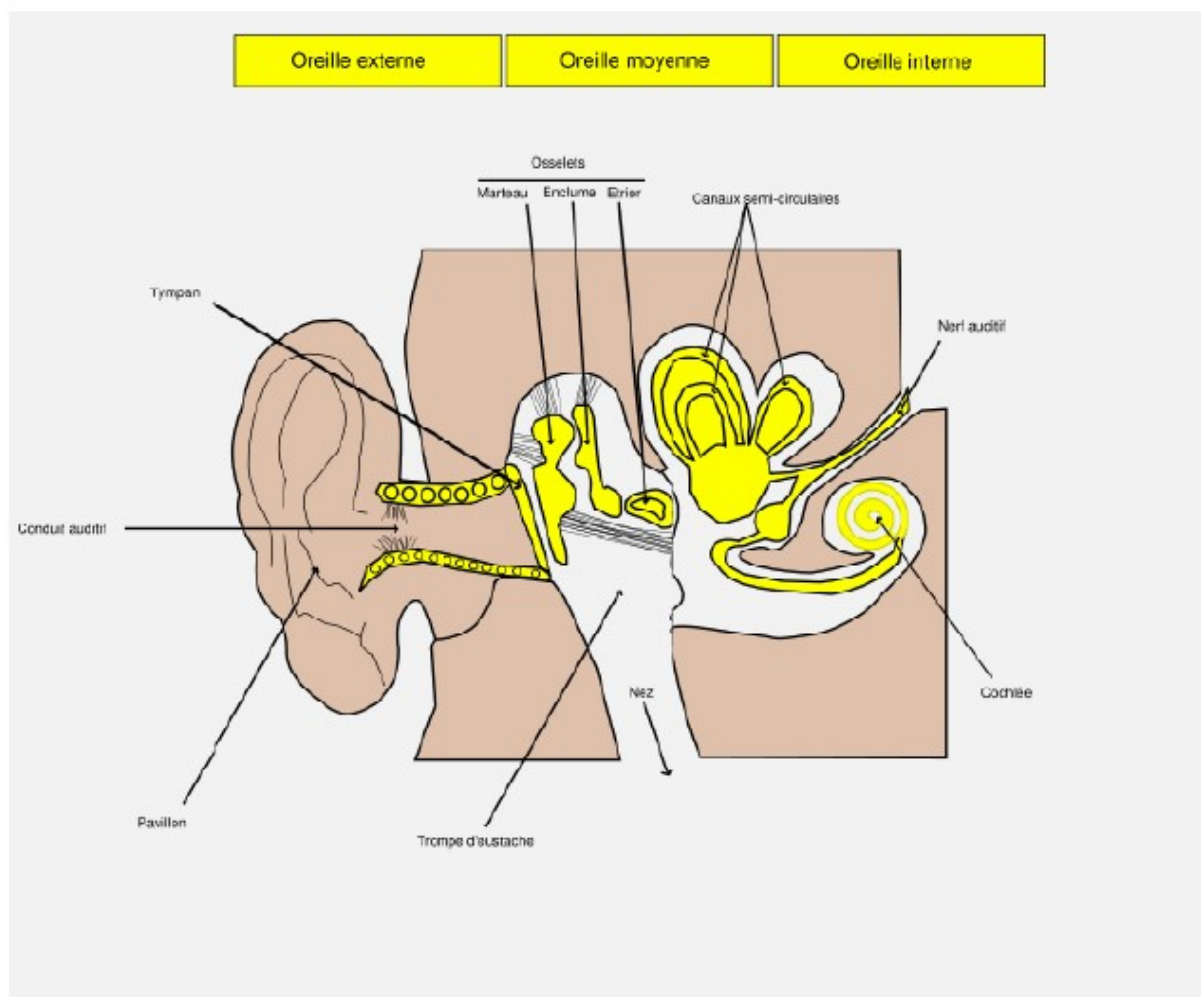
Notre espace de travail

De gauche à droite, les deux **lecteurs** de son qui peuvent travailler simultanément et qui tournent en boucle, le contrôle général du **volume** de la carte son, réglé à un niveau bas, pour limiter la distorsion, le **magnétophone**, l'explorateur où tombent les fichiers sonores et le **logiciel** SonNonLin qui les crée.



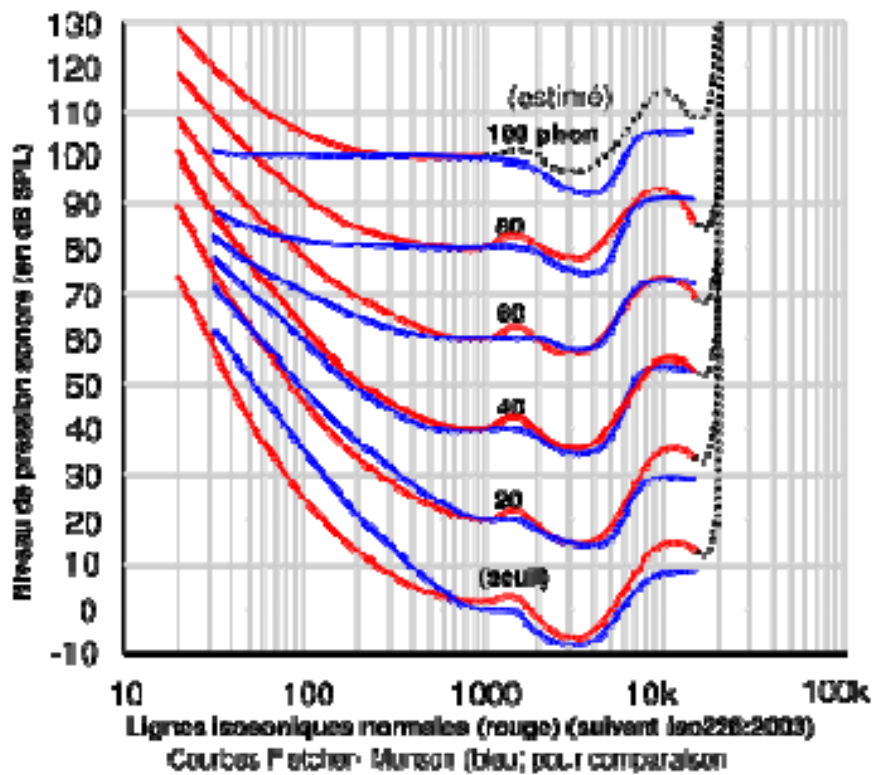
Comment fonctionne l'oreille ?

Image Wikipedia



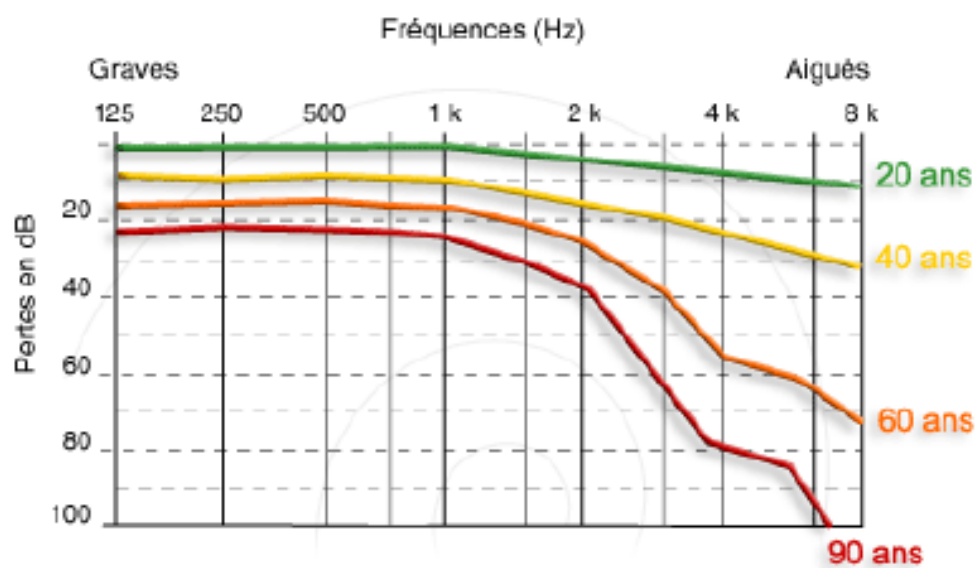
Audition et âge, le principe des sonneries antiprofs

Image Wikipedia



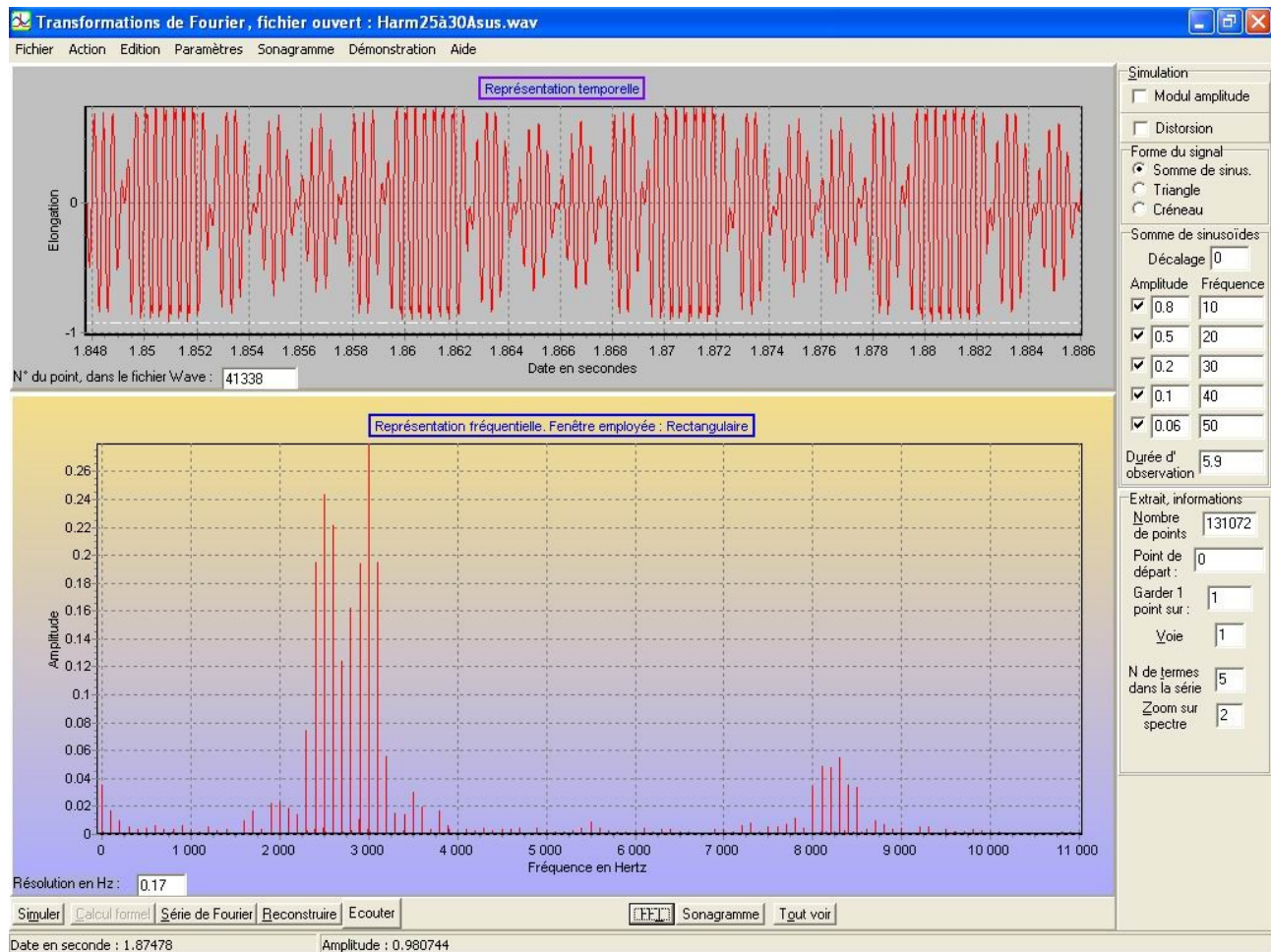
Audition et âge, le principe des sonneries antiprofs, suite

Image IURC-Inserm



Test de la chaîne sonore. Ordinateur portable.

Son Wave composé de la superposition de sinusoïdes de fréquences 2500, 2600, 2700, 2800, 2900 et 3000 Hz, toutes d'amplitude 0,1 V. Ce son est lu à l'aide de la carte son de notre ordinateur portable, puis envoyé sur des enceintes amplifiées de bonne qualité, mais de petite taille. Il est enregistré avec un microphone de qualité correcte et analysé à l'aide du logiciel WaveFFT réalisé par l'un de nos professeurs et disponible sur Internet.



Nous observons de nombreux **pics parasites** en fréquence.

Amélioration de la chaîne sonore. Ordinateur portable.

Nous diminuons l'amplitude du signal en sortie de la carte son et augmentons le volume des enceintes amplifiées.

Les pics parasites diminuent.



Amélioration de la chaîne sonore. Ordinateur portable.

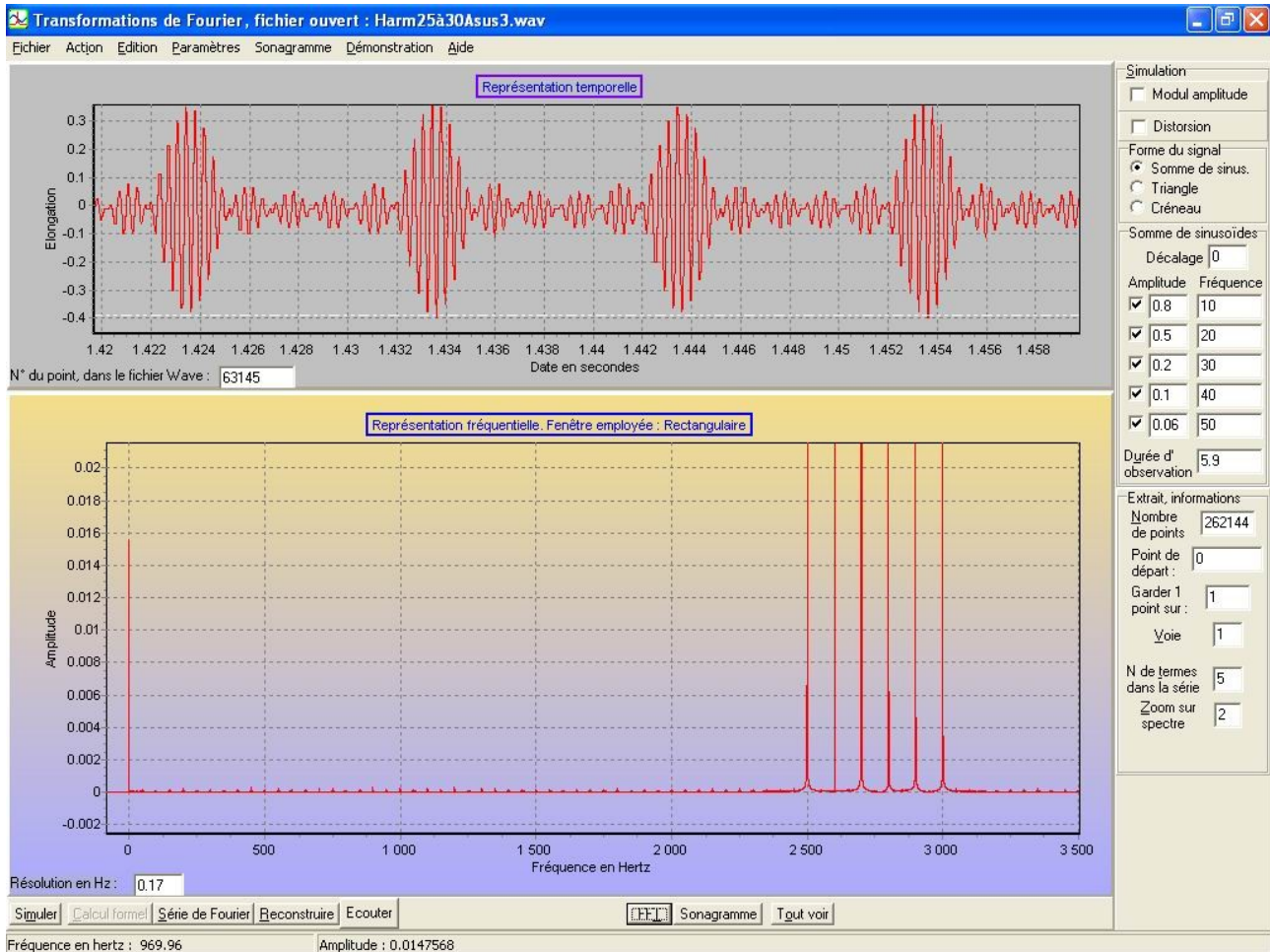
Nous diminuons fortement l'amplitude du signal en sortie de la carte son et augmentons le volume des enceintes amplifiées.

Les pics parasites disparaissent.



Amélioration de la chaîne sonore. Ordinateur portable. Zoom.

Le contrôle du volume est très bas, les pics parasites ont disparu. Image précédente avec zoom sur la représentation fréquentielle.



Non-linéarité du deuxième degré

$$\cos(a + b) = \cos a \cos b - \sin a \sin b$$

$$\cos(a - b) = \cos a \cos b + \sin a \sin b$$

$$\cos(a + b) + \cos(a - b) = 2 \cos a \cos b$$

$$\cos a \cos b = \frac{1}{2} [\cos(a + b) + \cos(a - b)]$$

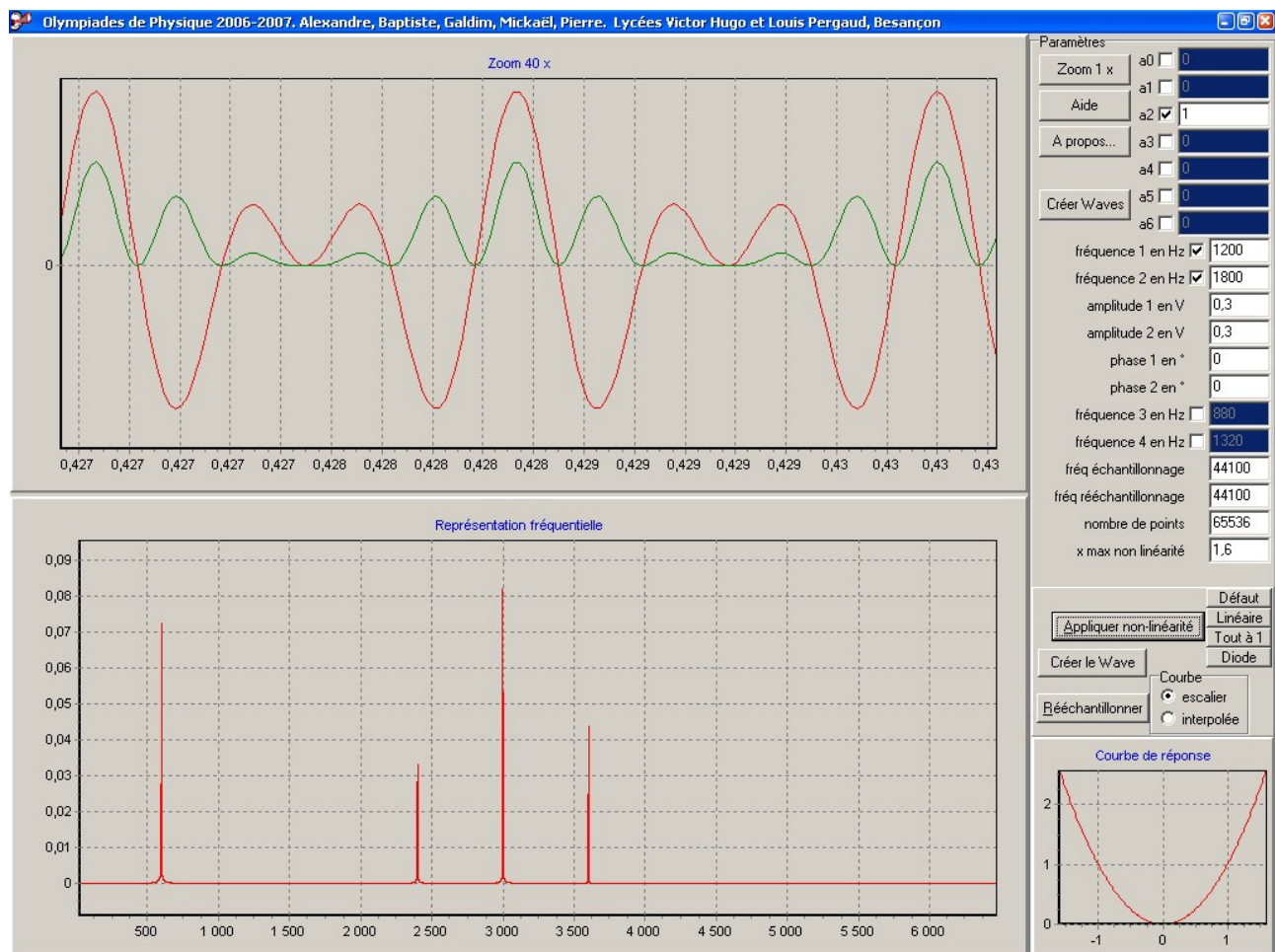
$$\cos^2 a = \cos a \cos a = \frac{1}{2} [\cos 2a + \cos 0] = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos 2a$$

La fréquence f_1 donne donc $2f_1$.

$$\begin{aligned} (\cos a + \cos b)^2 &= \cos^2 a + \cos^2 b + 2 \cos a \cos b = \\ &= 1 + \frac{1}{2} \cos 2a + \frac{1}{2} \cos 2b + \cos(a + b) + \cos(a - b) \end{aligned}$$

Les fréquences f_1 et f_2 donnent donc
 $2f_1$, $2f_2$, $f_2 - f_1$ et $f_2 + f_1$.

Voici ce que donne la superposition de 1200 et de 1800 Hz.

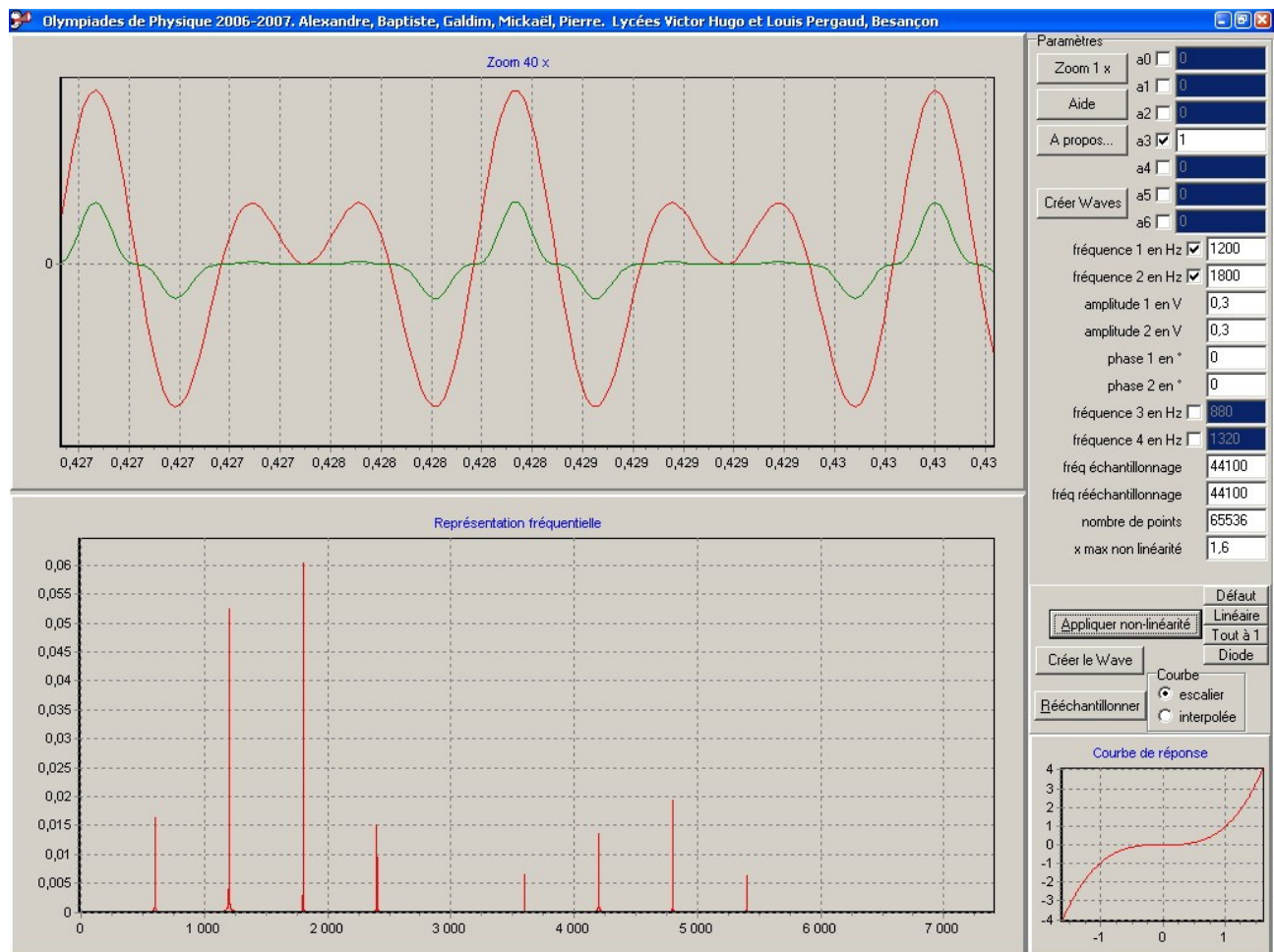


Non-linéarité du troisième degré

$$(\cos a + \cos b)^3 = \dots$$

Les fréquences f_1 et f_2 donnent donc

f_1 , f_2 , $2 f_1 - f_2$, $2 f_2 - f_1$, $3 f_1$, $3 f_2$, $2 f_1 + f_2$ et $2 f_2 + f_1$



Confirmation

Des recherches sur l'audition confirment nos hypothèses, par exemple sur le site :

<http://www.iurc.montp.inserm.fr/cric/audition/fran%E7ais/corti/hcells/ohc/ohcoaes/ohcoaes.htm>

on peut lire :

Produits de distorsion

Les produits de distorsion reflètent la non linéarité de la cochlée en bon état physiologique. En réponse à 2 sons de fréquence f_1 et f_2 , la cochlée émet plusieurs produits de distorsion : par ex. un $2 f_1 - f_2$ qui est **couramment utilisé en clinique et en recherche**.

Ce type d'otoémission, spécifique en fréquences, permet de réaliser un audiogramme objectif reflétant l'état fonctionnel des CCE.

Exemple d'audiogramme en produits de distorsion. L'amplitude de l'otoémission $2 f_1 - f_2$ est représentée en fonction de la fréquence du son f_2 . Noter la présence d'une réponse clairement identifiable par rapport au bruit de fond (tracé du bas) pour des fréquences de 1 à 6 kHz. L'absence, ou la pauvreté des mécanismes actifs cochléaires au dessous de 1 kHz ne permet pas de tester les fréquences graves. Au delà de 6 kHz, c'est l'équipement utilisé en clinique qui limite l'enregistrement des produits de distorsion.

Il s'agirait donc d'une non-linéarité du **troisième** degré.

Non seulement ces fréquences supplémentaires, créées par l'oreille, existent, mais elles sont employées pour déceler la surdité des nouveaux-nés.

Tartini

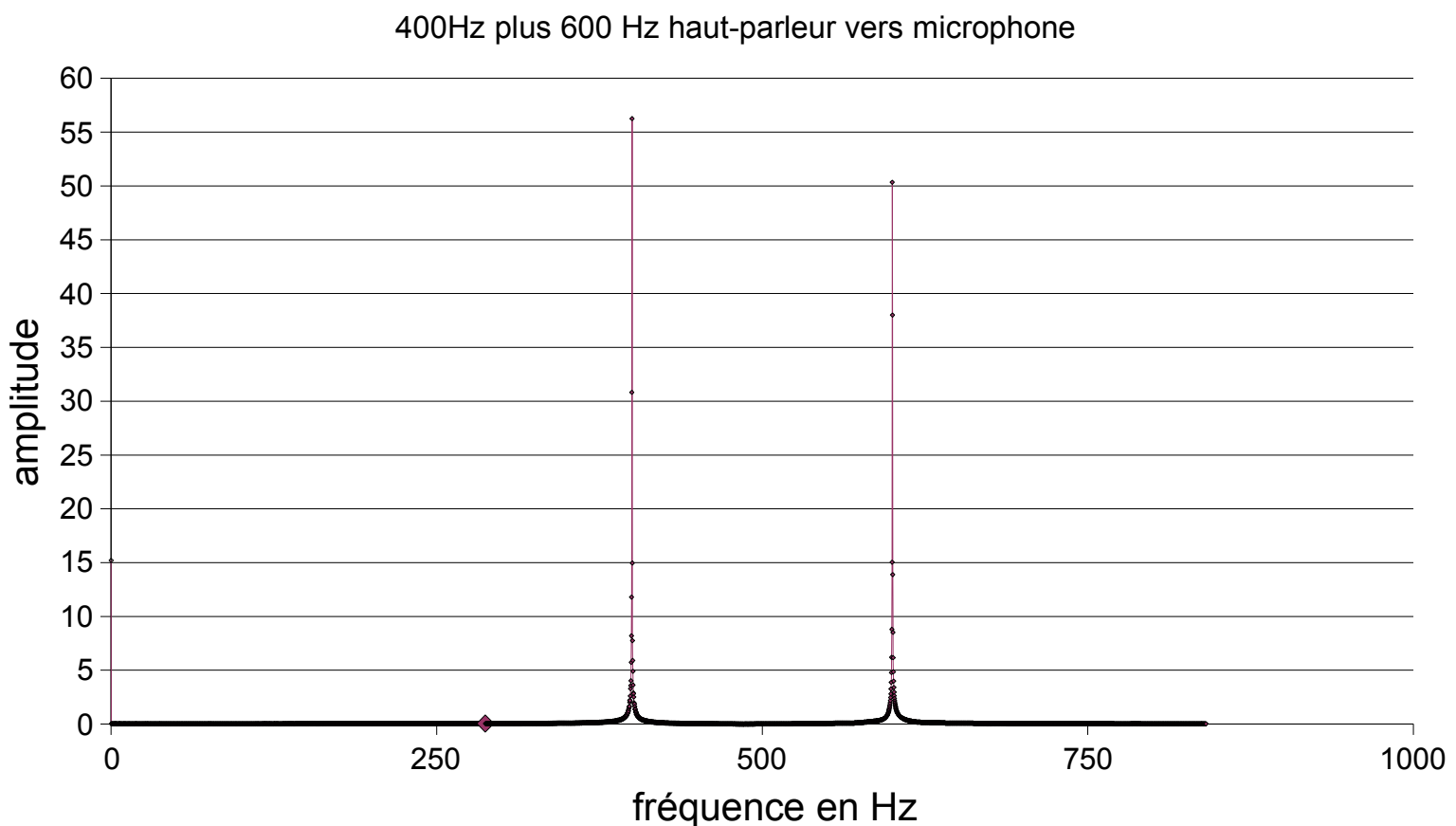
Le fondamental absent.

Deux notes comme Do₃ (261,63 Hz) et Sol₃ (392,00 Hz, soit environ 1,5 fois plus) jouées simultanément laissent **entendre** un Do₂ et, en écoutant attentivement, un Do₄.

L'analyse par un oscilloscope numérique muni de la FFT, du signal recueilli par un microphone, ne montre pas ces deux fréquences supplémentaires. Mais il y a beaucoup de parasites.

Le son peut être **enregistré** par le magnétophone de Windows, puis analysé à l'aide du logiciel WaveFFT disponible sur Internet. Il y a beaucoup moins de parasites. Les deux sons supplémentaires n'y sont pas.

Voici un exemple d'enregistrement avec du 400 et du 600 Hz



Tartini

Si une note est envoyée sur l'oreille gauche et l'autre sur l'oreille droite, la plupart des auditeurs n'entendent que ces **deux** notes.

Cela tendrait à montrer que le phénomène est produit dans l'oreille.

Mais notre conseiller scientifique, M Marc Tuloup, qui est à la fois Physicien et Musicien, a perçu le son grave, **parfois**, les deux notes étant séparées.

D'autres auteurs partagent son avis,
mais la majorité semble du nôtre.

Nous n'avons pas eu le temps de tester si la carte son ou le casque étaient en cause.

Les ultrasons

Nous alimentons deux haut-parleurs à ultrasons par deux générateurs réglés sur 40 000 et 41 000 Hz. Si les deux sont approchés de la même oreille, nous entendons du 1000 Hz.

Nous envisageons d'expliquer cela comme l'effet d'une non-linéarité du deuxième degré.

Mais notre conseiller scientifique - et musicien - nous fait remarquer que le son que nous entendons est un Si 3, à 500 Hz, soit $1/2 (f_2 - f_1)$. L'explication ne tient plus.

Nous décidons de ne pas traiter cette expérience dans notre exposé.

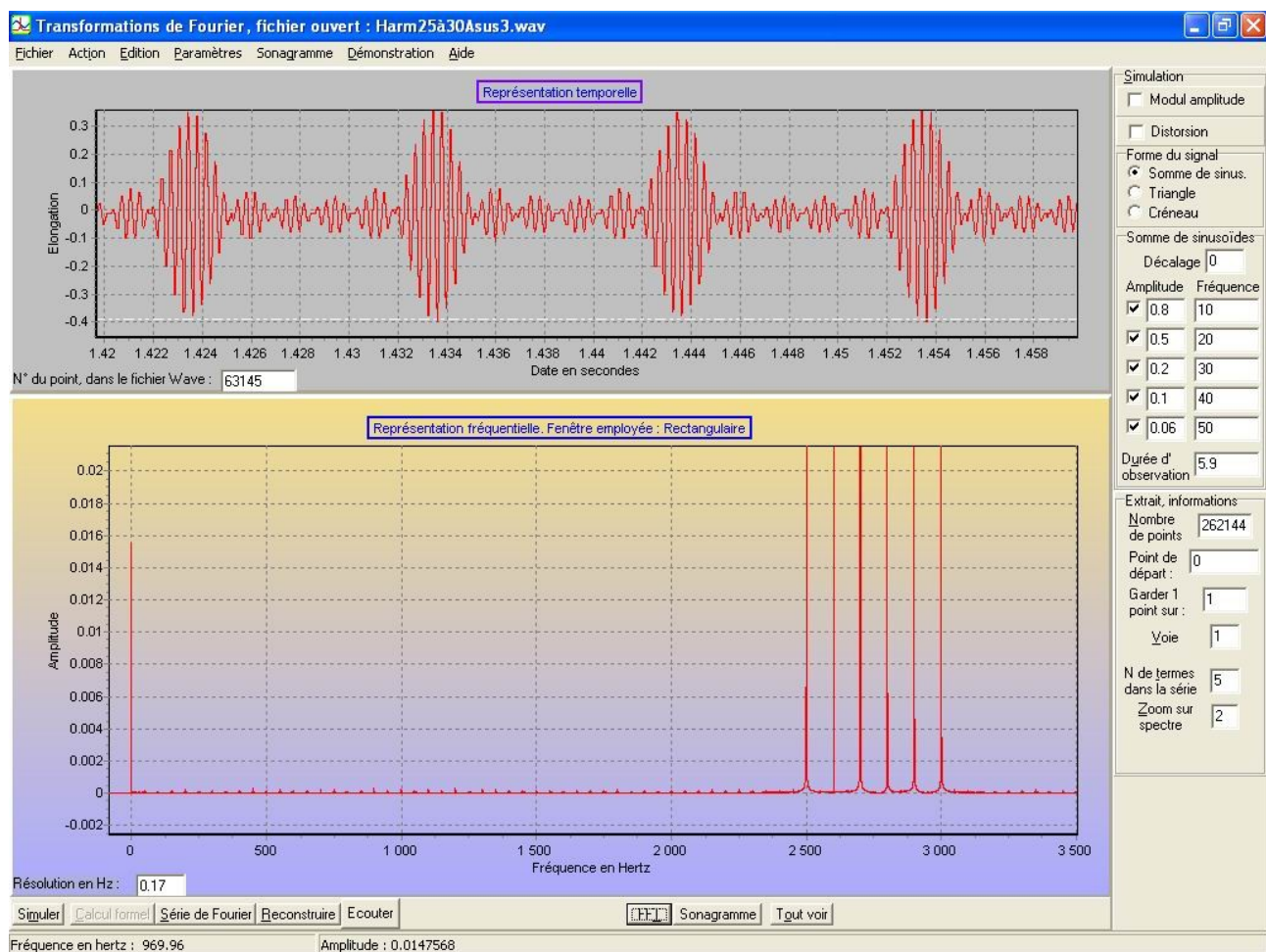
Mutin

Le fondamental absent.

Les harmoniques 25 à 30 du 100 Hz, joués assez fortement laissent entendre le **fondamental** absent, à 100 Hz. Ce 100 Hz est très directif, il faut tendre l'oreille vers le haut-parleur. On peut le faire **battre** avec du 102 Hz.

Par exemple tous les harmoniques ont une amplitude de 0,1 V et battent nettement avec du 102 Hz d'amplitude 20 fois plus faible soit 0,005 V. Si notre chaîne sonore était étalonnée, cela permettrait la mesure de l'amplitude de la fréquence de 100 Hz créée par l'oreille.

L'analyse par un oscilloscope numérique muni de la FFT, du signal recueilli par un microphone, ne montre pas cette fréquence supplémentaire. De même avec le magnétophone, image ci-dessous.



Interprétations

Helmholtz avait déjà proposé en 1863 la **théorie de la place** (une zone de la cochlée entre en résonance pour une fréquence incidente) : la composante à F_1 est le résultat de distorsion cochléaire. Cette distorsion réintroduit de l'énergie à la fréquence différence $(n + 1) F_1 - n F_1 = F_1$.

Chaque paire d'harmoniques adjacents génère de l'énergie dans le fondamental.

Georg von Békésy (prix Nobel 1961 de physiologie), [experiments.html](#) original publié en 1960, deuxième édition en 1989, avait montré qu'il ne s'agissait pas d'un phénomène de résonance, mais que la cochlée vibrait différemment selon la fréquence appliquée à la fenêtre ovale.

Il s'agirait donc plutôt d'une non-linéarité du **deuxième** degré.

Critique

Des auteurs contestent cette interprétation, en montrant que ce fondamental absent ne peut pas être masqué par un **bruit** à une fréquence voisine. Lieklider 1956.

Nous n'avons pas fait cette expérience.

Catastrophe

Shouten (1950 - 1970) propose de décaler les harmoniques 25 à 30 en fréquence, de la même valeur.

Si on décale d'une valeur Δf (par exemple 2 Hz) ces harmoniques, donc 2502, 2602, 2702, 2802, 2902, 3002, le fondamental paraît lui aussi décalé de Δf .

Cela n'est pas perceptible directement, le son grave paraît le même. Mais on peut faire battre ce 102 Hz avec du 100 Hz, et cela à une fréquence de 2 Hz.

Mais cela ne marche pas toujours, et surtout pas devant notre conseiller scientifique !

Catastrophe, catastrophe, catastrophe

Une autre possibilité est de superposer les fréquences

2400, 2500, 2600, 2700, 2800 Hz et

3002, 3102, 3202, 3302, 3402 Hz, en prenant soin d'éliminer l'harmonique 29.

On entend encore du (environ) 100 Hz, battant à 2 Hz.

Avec du 3000,5 et du 2100,5 etc, le battement est très lent.

Nous n'avons trouvé aucune explication à ce phénomène.

Conclusion

L'oreille, recevant une superposition de sons sinusoïdaux, perçoit dans certaines conditions des sons plus graves.

Nous avons tenté d'interpréter ce phénomène par des effets non-linéaires. Nous avons constaté que cette interprétation n'explique pas l'ensemble des sons graves perçus.

Nous avons utilisé ce phénomène pour créer nos propres mosquitones, audibles par les élèves, mais pas par leurs professeurs.